

1. はじめに

これまで、模型振動実験¹⁾や動的応答解析²⁾により、すべり現象を利用した免震橋梁の地震時の基本的振動特性について検討してきた。このような中、1995年1月に発生した兵庫県南部地震ではこれまでにない大きさの水平動ばかりでなく大きな上下動も観測された。すべり方式免震システムでは鉛直上向きの地震動が作用した場合にすべり面に作用する鉛直力が減少することに伴い摩擦力が減少し、すべり現象に伴うエネルギー減衰効果が減少することが考えられる。本研究では兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測³⁾された水平動と上下動が同時にすべり方式免震橋梁に作用した場合の橋梁の振動特性を解析的に検討し、すべり方式免震橋梁に及ぼす上下動の基本的な影響を検討した結果を報告する。

2. 神戸海洋気象台観測波の特徴

図-1および図-2に神戸海洋気象台で観測されたNS方向と上下方向の地震動の時刻歴波形と加速度応答スペクトルを橋梁の免震設計法マニュアル(案)⁴⁾で定義される2種地盤の保有水平耐力法に用いる標準地震波の時刻歴波形と加速度応答スペクトルとともに示す。海洋気象台NS成分の加速度応答スペクトルは周期0.35秒付近で最大となり、保有水平耐力法に用いる標準地震波の加速度応答スペクトルの約3倍に達している。ただし、周期がやや長く2秒以上の領域では保有水平耐力法に用いる標準地震波の加速度応答スペクトルのほうが海洋気象台波の加速度応答スペクトルより大きくなる。上下動の最大加速度は水平動の約40%で、周期0.25秒付近でスペクトルが大きく水平動の加速度応答スペクトルとほぼ等しくなる。

3. 上下動の影響を考慮したすべり方式免震橋梁の地震応答解析手法

すべり方式免震システムは、すべり支承に作用する上載荷重に比例する摩擦力によって生ずる履歴減衰を期待したシステムである。すべり方式免震橋梁に上下動が作用すると、橋桁に生ずる上下方向慣性力によりすべり支承に作用する上載荷重が変化し、摩擦係数が一定であっても摩擦力が時々刻々変化する。本報ではこの影響を考慮した解析を実施する。

1スパンの橋梁を対象とすることとし、最初に橋梁を図-3(a)に示すように剛な橋脚上にはばねと減衰要素で支持された橋桁質点で表し、上下動入力に伴う橋桁の応答を算出する。次に、橋桁質点の上下方向の慣性力の変化に伴う摩擦面に作用する鉛直力の変動を考慮して時々刻々の摩擦力を評価し、この摩擦力を考慮した上で

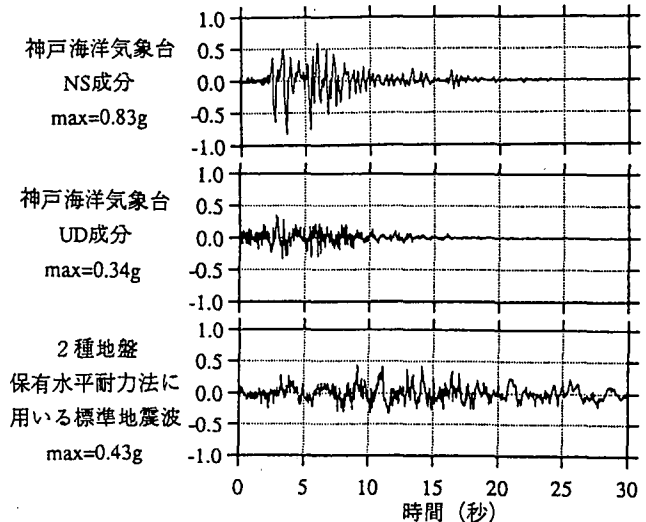


図-1 神戸海洋気象台観測波と2種地盤保有水平耐力法に用いる標準地震波

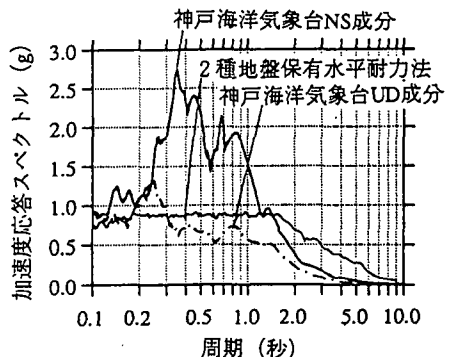


図-2 各地震波の加速度応答スペクトル

水平動に対する応答を算出する。この時の解析モデルを図-3 (b) に示す。

3. 1 上下動に対する支配方程式

すべり面に作用する上載荷重の変動を評価するために上下動による応答解析を実施した。橋桁を1質点とし、この質点を桁の曲げ振動の1次固有周期と等しくなるばねで支持した。(1)式に支配方程式を示す。

支配方程式

$$m_d \cdot (\ddot{u}_{dv} + \ddot{u}_{gv}) + c_{dv} \cdot \dot{u}_{dv} + k_{dv} \cdot u_{dv} = 0 \quad (1)$$

ここに、 m_d ：橋桁質量、 u_{dv} ：橋桁の地面に対する上下方向の相対変位、 c_{dv} ：橋桁の上下動に対する減衰定数、 k_{dv} ：橋桁の上下動に対するばね定数、 u_{gv} ：地面の上下方向の変位（上下方向の地震動）、 $(\dot{\quad})$ 、 $(\ddot{\quad})$ ：それぞれ時間に関する1階微分と2階微分を表す。

3. 2 水平動に対する支配方程式

(1)式で算出した橋桁の上下動を考慮して水平動による応答特性を算出する。ここでは、摩擦力を算出する時の橋桁重量が桁の上下方向慣性力の変化に伴い変化するものとして支配方程式を導く。(2)式、(3)式に上下動の影響を考慮した水平動の支配方程式を示す。

支配方程式

$$m_p \cdot (\ddot{u}_p + \ddot{u}_g) + c_p \cdot \dot{u}_p + k_p \cdot u_p - c_d \cdot \dot{u}_d - k_d \cdot u_d - f = 0 \quad (2)$$

$$m_d \cdot (\ddot{u}_d + \ddot{u}_p + \ddot{u}_g) + c_d \cdot \dot{u}_d + k_d \cdot u_d + f = 0 \quad (3)$$

ここに、 m_p ：橋脚質量、 u_d ：橋桁の橋脚に対する水平相対変位、 u_p ：橋脚の地面に対する水平相対変位、 c_d ：免震装置の減衰定数、 k_d ：免震装置の水平ばねのばね定数、 c_p ：橋脚の水平振動に対する減衰定数、 k_p ：橋脚の水平振動に対するばね定数、 u_g ：地面の水平変位（水平地震動）である。

また、 f は摩擦力で(4)式の数学モデルで表す。

$$f = \mu \cdot [g - \ddot{u}_{gv}] \cdot m_d \cdot [1 - \exp(-\delta \dot{u}_d)] / [1 + \exp(-\delta \dot{u}_d)] \quad (4)$$

ただし、 $g - \ddot{u}_{gv} < 0$ の場合、 $f=0$ とする。

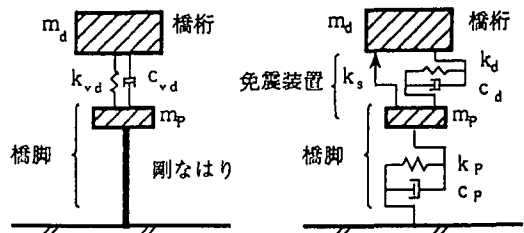
ここに、 μ ：摩擦係数、 g ：重力加速度、 δ ：すべり現象を表現するパラメータ（ここでは4.0を使用）

(4)式に上下方向慣性力の影響が重力加速度の変動という形で表れる。特に $g - \ddot{u}_{gv}$ が負になる場合は浮き上がりが生じると考えられるので、摩擦力をゼロとして解析する。

なお、解析はNewmarkのβ法を用い、時間ステップは0.0002秒とした。また、橋桁の上下方向の振動、橋脚および免震装置の水平方向の振動の減衰定数を5%で一定として解析を行った。

4. 基本応答特性

図-4、図-5に非免震時の水平振動の固有周期が0.5秒、橋桁の上下動の固有周期が0.25秒となる橋梁に、摩擦係数が15%のすべり支承と橋桁重量と水平ばねの剛性から算出される固有周期が2.5秒となる免震装置を設置した場合の橋梁各部の時刻歴波形と支承部の载荷履歴を示す。水平・上下動として、それぞれ神戸海洋気象台のNS成分とUD成分を用いた。なお、同図中には比較のために実施した、上下動の影響を考慮しない場合の解析結果を併せて示す。上下動の最大加速度は1.3gに達しおり、浮き上がりが生



(a) 上下動に対する解析モデル (b) 水平動に対する解析モデル

- m_p ：橋脚の質量
- m_d ：橋桁の質量
- k_p ：橋脚のばね定数
- k_d ：水平ばねのばね定数
- c_p ：橋脚の減衰係数（5%）
- c_d ：免震装置の減衰係数（5%）
- k_s ：すべり現象を表わす非線形ばね（鉛直動の影響考慮）
- k_{vd} ：橋桁の上下動の1次固有振動を表す鉛直ばね
- c_{vd} ：橋桁の上下動に対する減衰定数（5%）

図-3 解析モデル

じ摩擦面に作用する鉛直力がゼロとなる瞬間がある。しかし、支承相対変位の最大値は上下動の影響を考慮した場合も、その影響を考慮しない場合とほぼ等しく約13cmとなる。上下動の影響を考慮すると免震装置の載荷履歴は複雑となり、みかけの鉛直上載荷重の変化に伴い摩擦力が変動する。この変動に伴い支承に作用する水平反力の最大値が上下動がない場合より大きくなる。この影響で上下動を考慮した場合に、橋桁加速度の最大値が上下動の影響を考慮しない場合より25%程度増加する。

5. 免震システムの特性値の影響

非免震時の水平動の固有周期が0.5秒で橋桁の上下方向の固有周期が0.25秒および0.75秒となる橋梁に、摩擦係数15%のすべり支承を設置した免震橋梁の動的挙動を検討した。免震装置の水平ばね剛性は、ばね剛性と橋桁重量から算出される免震システムの固有周期が0.5秒から5秒まで0.5秒毎に変化するように設定した。入力波を神戸海洋気象台のNS成分（水平方向）、UD成分（上下方向）とした時の橋桁加速度および橋桁変位の最大値を図-6に示す。なお、図-6中には橋桁を剛と考え上下動の影響を考慮しない場合の解析結果も比較して示す。橋桁加速度は、免震システムの固有周期を非免震時の固有周期の5倍の2.5秒とした場合に、上下方向の振動を考慮すると最大で0.317gとなり上下方向の振動の影響を考慮しない場合の0.241gに比べて30%程度増加する。しかし、免震システムの固有周期が変化した場合の橋桁加速度の変動状況には桁の剛性の差に伴う上下方向の固有周期の差があまり影響を及ぼさず、最大でも30%程度の相違しか生じない。橋桁変位は、図-2に示すように入力地震波の加速度応答スペクトルが周期1秒以下で比較的大きいため、今回解析した周期の中では免震システムの固有周期が1秒の時に比較的大

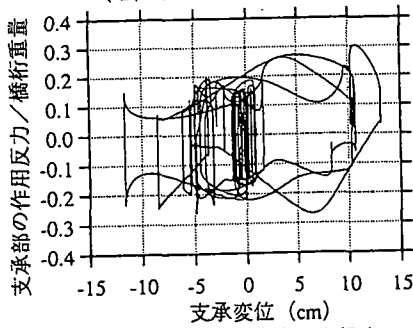
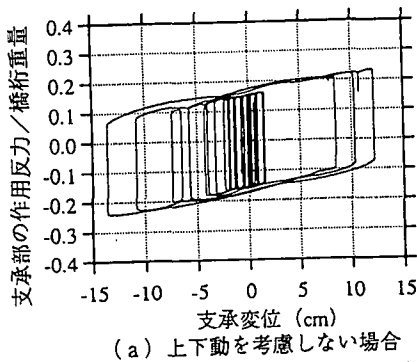


図-5 支承部の載荷履歴
(摩擦係数：15%、免震システムの固有周期：2.5秒)

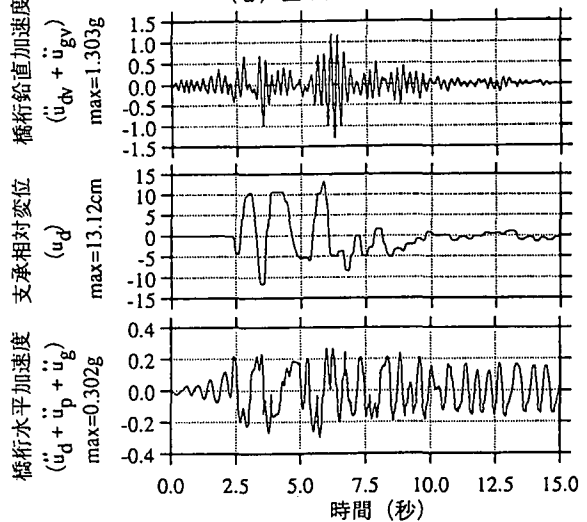
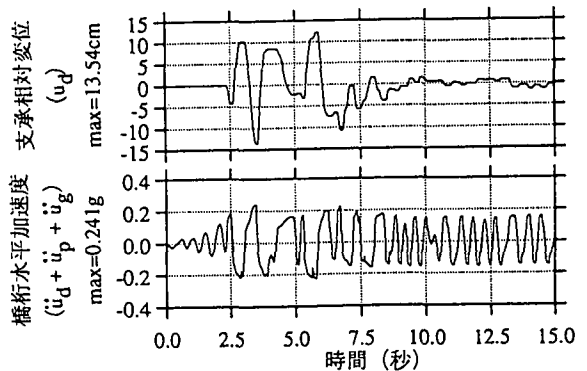


図-4 橋梁各部の応答波形
(摩擦係数：15%、免震システムの固有周期：2.5秒)

きく、橋桁の曲げ振動の固有周期を0.75秒とした場合に橋桁変位が30cm以上となる。また、橋桁の上下動を考慮した場合、免震システムの水平ばね剛性が弱く、免震システムの固有周期が長くなるにつれ橋桁変位が大きくなる傾向がある。上下動の影響を考慮した場合も考慮しない場合²⁾と同様に免震システムの固有周期を非免震時の橋梁の固有周期の4倍～5倍程度とすれば、橋桁変位を抑えながら大きな免震効果が得られる。

ここで、橋桁の剛性が異なり橋桁の上下動によって生ずる曲げ振動の固有周期が0.25秒から1.0秒まで0.25秒ピッチで変化する場合の橋桁加速度と橋桁変位の最大値の変化を図-7に示す。図には免震システムの固有周期を非免震橋梁の5倍の2.5秒とし、摩擦係数を10%、15%および20%と変化させた時の応答値を示してある。また、図中に橋桁の上下動を考慮しない場合の各摩擦係数に対応する応答値を併記してある。摩擦係数を一定とした場合、橋桁の曲げ振動の固有周期が変化しても橋桁加速度の変化は大きくなく、その差は最大でも30%程度である。また、摩擦係数が大きくなると、橋桁の曲げ振動の固有周期が異なる場合でも、橋桁に生ずる水平加速度が摩擦係数が小さい場合より大きくなる。橋桁変位は摩擦係数が比較的大きく20%となるケースで、橋桁の曲げ振動の固有周期が0.75秒となる時に最大値25cmとやや大きくなるが、他のケースでは橋桁変位がほぼ20cm以下となり概ね問題のない範囲に収まる。

6.まとめ

入力波が1種類ではあるがすべり方式免震システムを有する橋梁に水平動とともに上下動が作用した場合の基本的な応答特性を検討した結果、以下の点が明らかとなった。①上下動の影響を考慮すると、考慮しない場合に比べ橋桁水平加速度が最大で30%程度増加する。②上下動を考慮しない場合と同様に免震システムの固有周期を非免震橋梁の固有周期の4倍～5倍に設定すると橋桁変位を抑えながら大きな免震効果が得られる。

参考文献) 1) 岡本晋他、すべり方式免震システムを有する橋梁の動特性に関する実験的研究、土木学会論文集、NO.507/I-30、1995年1年、pp.167-178、2) 岡本晋他、すべり方式免震システムを有する橋梁の地震時挙動特性、土木学会論文集、NO.513/I-31、1995年4月、PP.191-200、3) 気象庁87型電磁式強震計波形データによる、4) 建設省、道路橋の免震設計法マニュアル(案)、(財)土木研究センター、1992年12月

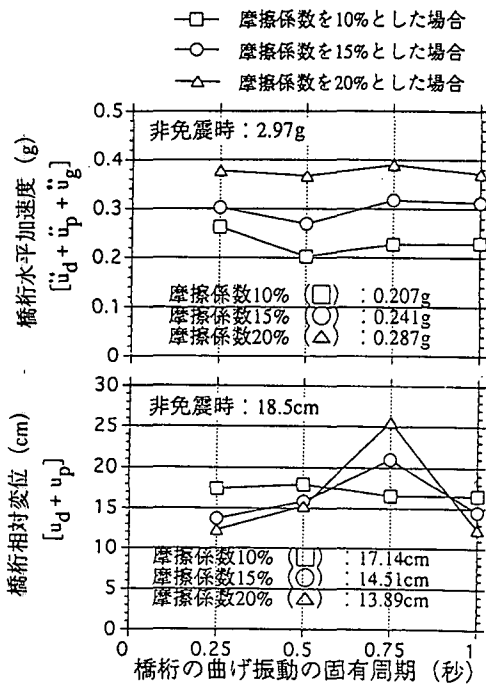


図-7 橋桁の曲げ剛性の影響
(免震システムの固有周期：2.5秒)

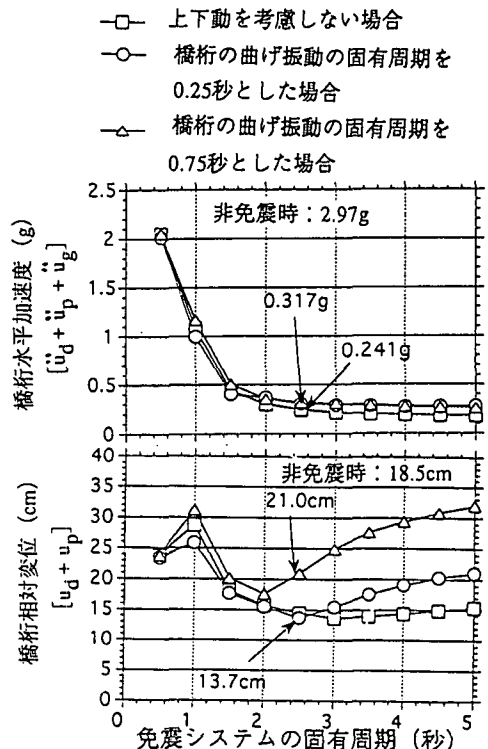


図-8 免震システムの固有周期の影響
(摩擦係数：15%)